

E-CONOM

Online tudományos folyóirat
Online Scientific Journal

Tanulmányok a gazdaság- és társadalomtudományok területéről
Studies on the Economic and Social Sciences



E-CONOM

Online tudományos folyóirat | Online Scientific Journal

Főszerkesztő | Editor-in-Chief

JUHÁSZ Lajos

Kiadja | Publisher

Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó |
University of West Hungary Press

A szerkesztőség címe | Address

9400 Sopron, Erzsébet u. 9., Hungary
e-conom@nyme.hu

A kiadó címe | Publisher's Address

9400 Sopron, Bajcsy-Zs. u. 4., Hungary

Szerkesztőbizottság | Editorial Board

CZEGLÉDY Tamás

JANKÓ Ferenc

KOLOSZÁR László

SZÓKA Károly

Tanácsadó Testület | Advisory Board

BÁGER Gusztáv

BLAHÓ András

FÁBIÁN Attila

FARKAS Péter

GILÁNYI Zsolt

KOVÁCS Árpád

LIGETI Zsombor

POGÁTSA Zoltán

SZÉKELY Csaba

Technikai szerkesztő | Technical Editor

TARRÓ Adrienn

A szerkesztőség munkatársa | Editorial Assistant

TARRÓ Adrienn

ISSN 2063-644X



Tartalomjegyzék | Table of Contents

CSUGÁNY Julianna

Az intézmények szerepe a technológiai haladás gazdasági növekedésre gyakorolt hatásának érvényesülésében

The Role of Institutions in Realising the Effects of Technological Progress on Economic Growth 1

ÚR Norbert

B2B kapcsolatok az üzleti hálózatban

B2B Relationship in Business Network 12

GYÖRKÖS Rita

Gyártósor-konfigurációk elemzése gyártósor-kiegyenlítési modellekkel egy alkatrész összeszerelő üzem példáján

Analysis of Assembly Line Configurations with Assembly Line Balancing Models in Case of a Part Manufacturer 22

KATONA Attila Imre

A beavatkozási határok módosítása a mérési bizonytalanság, valamint a termékparaméterek megváltozásának figyelembevételével a statisztikai folyamatszabályozásban

Modification of the Control Lines Considering the Measurement Uncertainty and the Product Characteristic Change in Statistical Process Control..... 35

KATONA Attila Imre

Ellenőrző kártya-illesztési folyamat kidolgozása a mérési bizonytalanság figyelembevételével a statisztikai folyamatszabályozásban

Construction and Implementation of Control Charts Considering Measurement-Uncertainty in Statistical Process Control..... 46

KURBUCZ Marcell

Emberi erőforrások optimális kiválasztásának vizsgálata a projekttervezésben

Impacts of Human Resources on Project Planning..... 58

NÉMETH Anikó

Berendezések karbantartásának mátrixos projekttervezése

Matrix-Based Planning of Maintenance Projects..... 79

NÉMETH Kristóf

GARCH modellek a pénzügyi kockázatok észlelésében

GARCH Models in the Perception of Financial Risks..... 99

Kiss Ágota

A valós értékelés létjogosultsága a tőzsdei vállalatok éves és a konszolidált beszámolóiban

The Role of Fair Value in Annual and Consolidated Report of Stock Firms 116

CZELLENG Ádám

Flexibilitás hatása a tőkeszerkezetre

The Impact of Flexibility on the Capital Structure..... 128

ÉKES Szeverin Kristóf

A vállalati szektor csődelőrejelzésének „relativitás elmélete”

The Theory of Relativity of the Bankruptcy Forecast in the Company Sector..... 141

DURKÓ Emília

Földgáz- és megújuló energia alapú fűtési rendszerek beruházás

gazdaságossági vizsgálata egy 100 m²-es családi ház példáján keresztül

*Examining the Investment Economy of Heating System Using Natural Gas and
Renewable Energy Resources through the Example of a 100 m² Detached House.....* 156

Gyártósor-konfigurációk elemzése gyártósor-kiegyenlítési modellekkel egy alkatrész összeszerelő üzem példáján

GYÖRKÖS Rita¹

Gyártósor-kiegyenlítés (Assembly line balancing = ALB) során műveleteket rendelünk munkahelyekhez oly módon, hogy a munkahelyek terheltsége lehetőleg kiegyenlített legyen, ugyanis a gyártósor kapacitását a szűk keresztmetszetben lévő munkahely kapacitása határozza meg. A gyártósor-kiegyenlítési modellek a műveletek munkahelyekhez való optimális hozzárendelését határozzák meg a műveleti idők alapján. A gyártósor-kiegyenlítési feladatra kapott tényleges megoldás és az elméletileg optimális megoldás viszonyát a hozzárendelés hatékonysága (HH) fejezi ki, mely a termelésmenedzsment döntéstámogató eszköze. Ezért is fontos, hogy a valóságot lefedő, vagy jól közelítő modelleket alkossunk. A gyártás kezdeti szakaszában a műveletek elvégzéséhez szükséges idők jelentősen csökkennek, ami a tanulási hatás jelenségével magyarázható. E tanulmány keretében egy elektronikai eszközöket összeszerelő folyamat példáján mutatom be, hogyan vizsgálható különböző gyártósor-elrendezések teljesítménye egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellekkel, továbbá vizsgálom a tanulási hatás és a hozzárendelési hatékonyság kapcsolatát. Az esettanulmányban szintén bemutatom, hogy a folyamatok javítása milyen módon csökkenti a költségeket és növeli a kapacitást.

Kulcsszavak: gyártósor-kiegyenlítés, gyártósor konfigurációk, termelésmenedzsment, matematikai programozás, lean termelés, termelési kapacitás

JEL-kódok: L680, O210, O220

Analysis of assembly line configurations with assembly line balancing models in case of a part manufacturer

In the course of assembly line balancing (ALB) tasks are assigned to workstations preferably in a way that the loading of the workstations is equal, since the capacity of an assembly line is determined by the capacity of the workstation in the bottle-neck. Assembly line balancing models determine the optimal assignment of task to workstation by task times. The efficiency of task assignment is defined as the ratio of time available for production at the actual solution of the ALB model and at the theoretical optimum. This ratio can be a useful tool for production managers in line configuration decisions. Consequently, it is important that ALB models reflect all important aspects of reality. In the initial phase of production the task times decrease rapidly as a consequence of the learning effect. This paper analyses two assembly line configurations with simple assembly line balancing models and the effect of learning on the efficiency of task assignment with the help of the assembly process of an electrical motor. This case study also shows how improving production processes can decrease costs and increase capacity.

Keywords: assembly line balancing, assembly line configurations, production management, mathematical programming, lean production, production capacity

JEL Codes: L680, O210, O220

¹ A szerző a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gazdaságtudományi Karának PhD hallgatója (gyorkos AT mvt.bme.hu)

Bevezetés

Olyankor beszélünk gyártósor-kiegyenlítési (assembly line balancing = ALB) problémákról, amikor számos oszthatatlan tevékenységet (műveletet) kell csoportokba rendezve munkaállomásokhoz rendelni egy folyamatos gyártást végző gyártósornál oly módon, hogy a hozzárendelés a menedzsment szempontokat érvényesítő célfüggvény tekintetében optimális legyen. A hozzárendelésnél figyelembe kell venni számos korlátozó feltételt, például ciklusidő korlátokat, a műveletek logikai sorrendjét, területi feltételeket, és további technológiai és logikai korlátokat. A korlátozó feltételeket gyakran több megoldás is kielégíti, ezek közül optimalizáló modellek segítségével tudjuk kiválasztani a legjobbat. Erőforrás-felhasználás szempontjából optimális hozzárendelés esetén a szükséges dolgozók száma és ezen keresztül a működési költségek a lehető legkisebbek. A gyártósor-kiegyenlítési problémák tipikus példája az autóipar és az elektronikai ipar (hűtőgépek, televízió készülékek összeszerelése stb.), de sok szolgáltató rendszer folyamata is hasonló a gyártósorok szerelési műveleteihez (*Boysen et al., 2008*).

Számos publikáció született az ALB modellek gyakorlati alkalmazásáról (*ld. pl. Corominas et al., 2008; Koltai és Tatay, 2010; Cortes et al., 2010*). A következőkben egy általam készített esettanulmányon keresztül mutatom be, hogyan használhatóak az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellek gyártósorok teljesítményének összehasonlítására és értékelésére. Kutatásaimat a Phoenix Mecano Kecskemét Kft. Dewert profitcenterében végeztem, ahol ágyomozgató berendezéseket állítanak elő széles választékban. A gyártott termékek elsődlegesen az ápolási-, illetve kórházszektorban alkalmazhatók, emellett beépíthetők a legkülönbözőbb bútorapplikációkba is. Ezen termékek közül én egy egymotoros külső vezérlésű emelő készülék összeszerelését vizsgáltam, amelyet elsősorban kézi szereléssel állítanak elő, az egyedüli gépi művelet a tesztelés. A vizsgált időszakban ezt a készüléket kétféle gyártósoron szerelték össze: szigetszerű elrendezésnél, melynél négy operátor dolgozott, és U-cella elrendezésben, ahol heten dolgoztak (*ld. még Koltai és Györkös, 2012*).

Mindennapi életünkben is tapasztaljuk, hogy minél többször végzünk el egy feladatot, annál rövidebb idő alatt készülünk el vele. Termelés-gazdaságtani kérdéseknél, ahol magas az élő munka aránya, a tanulási hatás a fajlagos gyártási idő csökkenésén keresztül jelentkezik. Ez két dolgot jelent. Egyrészt a gyártott mennyiség növekedésével csökken a fajlagos gyártási költség. Másrészt közvetetten nő az egy időszakra jutó kapacitás, mert azonos idő alatt többet tudunk gyártani.

Ha egy gyártósoron ugyanazt a terméket kevesebb operátor szereli össze, akkor egy operátorra több művelet jut, így a hozzá tartozó műveleti idők összege is nagyobb. Ezáltal adott műszak alatt egy-egy műveletet kevesebbszer végez el, mintha ugyanezen a gyártósoron több dolgozó szerelné ugyanezt a típusú terméket. Utóbbi esetben ugyanis egy dolgozóra fajlagosan kevesebb művelet jut, így az egy operátorhoz tartozó műveleti idők összege is alacsonyabb. Ennek azért is van jelentősége, mert a tanulási hatás a kezdeti szakaszban a legszámottevőbb, tehát az első pár ismétlésnél, darabnál a legnagyobb a műveletek elvégzéséhez szükséges idő csökkenése.

A gyártósor kiegyenlítése mellett további kedvező hatás érhető el a folyamatok javításával, a folyamatokban rejlő veszteségek kiküszöbölésével, ami részben költségcsökkenésen, részben kapacitásnövekedésen keresztül érvényesül.

A tanulmányban először bemutatom a vizsgált terméket és áttekintem a termelési folyamatot. Ezután ismertetem az alkalmazott ALB modelleket. Majd bemutatásra kerül a tanulási hatás, a hozzárendelés hatékonysága, valamint szót ejtek az alternatív optimális megoldásokról. Ezt követően bemutatom a folyamatok javításának ÁKFN struktúrára és kapacitásjellemzőkre gyakorolt hatását. Végezetül összefoglalom a kapott eredményeket és a kutatásomból levonható következtetéseket.

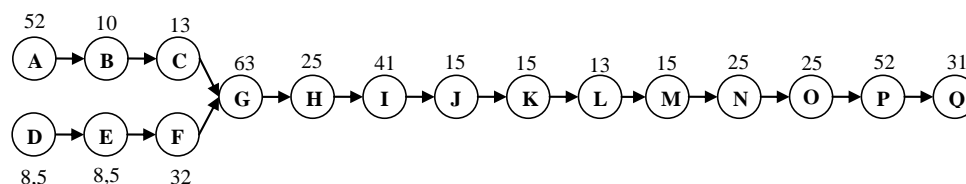
A vizsgált szerelési folyamat

Az általam vizsgált és e tanulmányban bemutatott szerelési folyamatot a Phoenix Mecano Kecskemét Kft-nél valósítják meg, amely a világszerte több gyártóbázissal és az egész világot átfogó értékesítési hálózattal rendelkező Phoenix Mecano AG svájci központú multinacionális cégcsoport 1993-ban megalapított legjelentősebb leányvállalata. A vállalat különböző ipari ágazatok beszállítójaként műanyag-, alumínium- és poliészterházakat, mozgatóstechnológiai berendezéseket és vezérléseket, emelőberendezéseket, műanyag alkatrészeket, valamint lineáris egységeket és védőrács-rendszereket gyárt (*Phoenix Mecano honlapja, 2013*).

A vállalat nagy hangsúlyt fektet a termelékenység és a hatékonyság folytonos javítására, ezért érdekelt minden olyan módszer alkalmazásában, ami ezt elősegíti.

A vizsgált berendezés, amelyen keresztül bemutatom az egyszerű gyártósorkiegyenlítési modellek alkalmazását, egy egymotoros külső vezérlésű emelő készülék, amelyet főként kórházi ágyak dőlésszögének beállításához használnak. A szerelési folyamat műveleteit, a hozzájuk tartozó időadatokat, valamint a műveleteket közvetlenül megelőző műveletek listáját az 1. táblázat foglalja össze.

Az 1. táblázat alapján elkészíthető a készülék szerelési műveleteinek logikai kapcsolatát szemléltető precedencia gráf (ld. 1. ábra).



1. ábra: A vizsgált készülék összeszerelési műveleteinek idejét (másodpercben) és logikai kapcsolatát szemléltető precedencia gráf

Forrás: Saját szerkesztés Phoenix Mecano-s vállalati információk alapján

A terméket a vizsgált időszakban kétféle gyártósoron gyártották: szigetszerű elrendezésben, és az akkor még próbajelleggel működő U-cella koncepcióban.

A szigetszerű gyártósoron 4 operátor dolgozott és a készülékeket hatosával továbbították. Ebben az elrendezésben a dolgozók körbeállták a munkaasztalt, így végezték a műveleteket. A dolgozóknak sokat kellett forogniuk, egyes esetekben lépniük is, mert bizonyos alkatrészek mögöttük helyezkedtek el. A fölösleges, értéket nem teremtő mozdulatok veszteséget, "mudát" jelentenek, cél ezeknek a kiküszöbölése.

Az U-cella koncepcióban heten dolgoznak, és egyesével továbbítják a munkadarabokat, tehát ezen a soron darabonkénti anyagáramlást, vagy másként "one piece flow"-t valósítanak meg. Az operátorok egy U alakú asztal belső oldalán állnak, és kívülről kapják az anyagokat, megszüntetve ezzel a fölösleges forgásokból és lépésekből adódó veszteségeket. Az U-cella kialakítás egyik célja a nullhiba koncepció volt, amely a one piece flow-val kombinálva megteremti a legjobb minőség elérésének lehetőségét. A minőség javításán túl fontos cél volt még a termelékenység növelése, a terület-kihasználás javítása és a költségek csökkentése is.

1. táblázat: A vizsgált készülék műveleteinek leírása, a műveleti idők másodpercben és a közvetlenül megelőző műveletek listája

Forrás: Saját szerkesztés Phoenix Mecano-s vállalati információk alapján

Műv. kód	Műveletek leírása	Műv. idők (mp)	Közvetlenül megelőző műv.
A	Menetes orsó szerelése (alátét, csapágó, csigakerék, stift)	52	-
B	Menetes orsót zsírzógépbe tesz	10	A
C	Menetes orsó zsírzása (típusfüggő)	13	B
D	Kupakot a vezetőprofilra kézzel rányom, befogóba betesz	8.5	-
E	Kupakot présel	8.5	D
F	Kupakot csavaroz, zsíroz, végálláskapcsolót behelyez	32	E
G	Hajtóműházat + csoportszerelt orsót + hajtóműoldali villafejet összeszerel	63	C, F
H	Kábelszerelés (csatlakozó kábel)	25	G
I	Motor csatlakozó kábelek fűzése, csatlakoztatása, kábelleszorító behelyezése	41	H
J	Motort zsíroz, házba tesz	15	I
K	Motort csavaroz	15	J
L	Rögzítőcsavart fúr, csavaroz	13	K
M	Motorkupak + emelőprofil betekérése	15	L
N	Készüléket tesztelőre felhelyez	25	M
O*	Tesztelés	25	N
P	Tesztelőről levesz, meghúz, dugóz, címkéz	52	O
Q	Takarít és kartonba tesz	31	P

A tanulmányban használt jelöléseket az alábbi felsorolás tartalmazza.

- Indexek:
 - i = műveletek indexe (sorszáma) ($i=1, \dots, I$),
 - k = a műveletek egy részhalmazának indexe,
 - p = a műveletek egy részhalmazának indexe,
 - q = a műveletek egy részhalmazának indexe,
 - j = munkahelyek indexe (sorszáma) ($j=1, \dots, J$).
- Paraméterek:
 - I = műveletek, tevékenységek száma,
 - J = munkahelyek feltételezett száma a modell felírásakor,
 - N = munkahelyek tényleges száma,
 - t_i = az i tevékenység végrehajtásához szükséges idő,
 - $\sum_{i=1}^I t_i$ = egy darab termék előállításához szükséges összes idő,
 - T = a gyártáshoz rendelkezésre álló összes idő,
 - T_c = ciklusidő,
 - LJ_i = a legelső olyan munkahely, amelyhez az i tevékenység hozzárendelhető,
 - UJ_i = a legutolsó olyan munkahely, amelyhez az i tevékenység hozzárendelhető,
 - Q = gyártósoron gyártandó mennyiség,
 - T_c^{\max} = a ciklusidő maximális értéke,
 - HH = hozzárendelés hatékonysága,
 - Y_Q = a feladat Q -adik végrehajtásához szükséges idő,
 - b = tanulási hatást kifejező paraméter,
 - L = tanulási ráta,

- N_y = nyereség,
- \dot{A} = árbevétel,
- a = egységár,
- r = fajlagos közvetlen anyagköltség,
- c = munkaidő egységnyi költsége,
- $K_{fö}$ = összes fix költség,
- $K_{pö}$ = összes proporcionális költség,
- Halmazok:
 - R = a közvetlen megelőzési kapcsolatok halmaza, tehát $(p;q) \in R$, ha p művelet közvetlenül megelőzi q műveletet,
 - P_i = az i tevékenységet megelőző összes tevékenység halmaza,
 - S_i = az i tevékenységet követő összes tevékenység halmaza,
- Döntési változók:
 - x_{ij} = 0-1 értékű döntési változó; x_{ij} értéke 1, ha az i tevékenységet a j munkahelyen végezzük el; x_{ij} értéke minden más esetben 0.

A matematikai programozási modell

Célunk, hogy meghatározzuk a maximálisan gyártható mennyiséget két eltérő hosszúságú gyártósorra: a négy munkaállomással rendelkező szigetszerű elrendezésre és az U alakú hetes gyártósor-konfigurációra. A feladatot az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modell kettes típusával (SALBM-2) oldjuk meg, amely minimalizálja a ciklusidőt adott munkahely-szám esetén. Az SALBM-2 modell a következőképpen írható fel (Koltai és Tatay, 2010; Koltai és Györköcs, 2012):

$$\text{Min } T_c \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I t_i x_{ij} \leq T_c \quad j = 1, \dots, J \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, I \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J j \cdot (x_{qj} - x_{pj}) \geq 0, \quad (p, q) \in R \quad (4)$$

$$LJ_i = \left\lceil \frac{t_i + \sum_{k \in P_i} t_k}{T_c^{\max}} \right\rceil \quad (5)$$

$$UJ_i = (J+1) - \left\lceil \frac{t_i + \sum_{k \in S_i} t_k}{T_c^{\max}} \right\rceil \quad (6)$$

$$x_{ij} = 0 \quad j < LJ_i; j > UJ_i; i = 1, \dots, I \quad (7)$$

Az SALBM-2 modell célja (1), hogy minimalizálja a ciklusidőt adott munkahely-szám mellett. Ez egyben a gyártható mennyiség és a kapacitáskihasználás maximalizálását is jelenti. Az első feltétel (2) azt írja elő, hogy a munkahelyekhez rendelt műveleti idők összege sehol nem haladhatja meg a ciklusidőt. A második feltétel (3) azt mutatja, hogy minden műveletet

el kell végezni. A harmadik feltétel (4) a műveletek logikai kapcsolatát határozza meg, amely grafikusan precedencia gráffal szemléltethető (esetünkben ld. 1. ábra). A döntési változók száma a (6)-os és (7)-es egyenletekkel csökkenthető, amelyek korlátozzák a munkahelyek lehetséges indexeit azzal, hogy a nagyon korai tevékenységek nem kerülhetnek nagyon késői műveleti helyekre, illetve a precedencia gráf végén lévő műveletek nem rendelhetők nagyon korai munkahelyekhez. A lehetséges munkahely-indexek korlátozására egy hatékonyabb modellt fejlesztett ki *Pastor és Ferrer (2009)*, de az esetpéldánk, méreténél fogva, nem igényli ennek a kifinomultabb módszernek az alkalmazását.

Megoldottam a SALBM-2 modellt a vizsgált készülék adataira. Az SALBM-2 modell döntési változóinak száma a műveletek számának és a munkahelyek számának a szorzata, tehát $I \cdot N$. Esetünkben ez 68 döntési változót jelent a szigetszerű elrendezésnél, és 119 döntési változót az U-cella gyártósor esetében. Egy matematikai programozó szoftver egy ilyen méretű példát másodpercek alatt megold. Számításaimat a Lingo elnevezésű professzionális operációkutatási szoftverrel végeztem, de a gyakorlati használhatóság érdekében az adatokat MS Excel segítségével jelenítettem meg.

Az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési feladatok 1-es modelljének (SALBM-1) célja, hogy adott idő alatt meghatározott mennyiségű termék legyártása mellett minimalizálja a műveleti helyek számát. Tehát adja meg azt a munkahely-számot, amely minimálisan szükséges ahhoz, hogy a kívánt mennyiséget le tudjuk gyártani adott időkorlát (pl. 1 műszak) alatt. Mivel a gyártósorok hossza adott volt, ezért az 1-es modell nem kerül részletes ismertetésre, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy az 1-es és 2-es modellt gyakran használják együtt: az 1-es modellel kapott minimális munkahely-számhoz a 2-es modellel a ciklusidő minimalizálásán keresztül meghatározzák a maximálisan gyártható mennyiséget.

A kapott eredmények értelmezése

Az SALBM-2 modell megoldásával a 4-es és 7-es gyártósor-konfigurációkra kapott eredményeket és a tapasztalati adatokat (a gyakorlatban a műszakonkénti gyártási mennyiségekre előírt normákat) a 2. táblázat foglalja össze.

A 2. táblázatból látható, hogy mind elméleti (SALBM-2 oszlopok), mind gyakorlati (normaadat oszlopok) esetben a 7-es elrendezésnél alacsonyabb a ciklusidő és magasabb a műszakonként maximálisan gyártható készülékek száma. Mivel U-cella koncepció esetén ugyanannyi mennyiségű munkát, feladatot több munkahely között kell szétosztani, így egy emberre kevesebb tevékenység jut (az egy munkahelyhez rendelt műveletek összes ideje alacsonyabb), ezáltal csökken a ciklusidő, ennek eredményeként pedig nő a műszakonként maximálisan gyártható mennyiség. (Fontos megjegyezni, hogy ez nincs mindig így. A gyártósor kapacitását a szűk keresztmetszet kapacitása határozza meg. Ha a tevékenységek között szerepel egy nagyon magas végrehajtási idejű művelet, amit már nem lehet tovább osztani, és ezt a tevékenységet egyedüli műveletként rendeljük egy munkahelyhez, akkor amint e munkahely szűk keresztmetszetté válik, a gyártósor hosszának növelése nem jár már termelésnövekedéssel - feltételezve, hogy párhuzamosan egy műveletcsoportot csak egy munkahely végez.)

Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy amíg az elméleti modellek alapján a 4-es elrendezés bizonyult hatékonyabbnak, tehát a vizsgált időszakban az egy főre jutó fajlagos gyártási mennyiség a szigetszerű gyártás esetén a magasabb, addig a tapasztalati adatok ezzel pont ellentétes eredményt mutatnak, ugyanis a normatáblázat alapján az U-cella gyártósor-kialakítás az előnyösebb. Ez részben a tanulási hatással is magyarázható, amit az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellek nem vesznek figyelembe.

2. táblázat: A gyártósor-konfigurációk összehasonlítása

Forrás: Saját szerkesztés a SALBM-2 modell eredményei és Phoenix Mecano-s vállalati információk alapján

SALBM-2 megoldásával kapott eredmények és a tapasztalati adatok összehasonlítása	Szigetszerű elrendezés, SALBM-2	U-cella koncepció, SALBM-2	Szigetszerű elrendezés, normaadat	U-cella koncepció, normaadat
Munkahelyek száma [db]	4	7	4	7
Ciklusidő [mp]	124	81	114,8	60
Maximálisan gyártható mennyiség műszakonként [db/műszak]	212,9	325,9	230	440
1 főre vetített gyártási mennyiség műszakonként [db/műszak/fő]	53,23	46,56	57,50	62,86

Tanulási hatás

A tanulási hatás a gyártási mennyiség növekedésével járó fajlagos végrehajtási idő csökkenését leíró jelenség. Az olyan gyártási folyamatokban, ahol magas az emberi munka aránya, a tanulási hatás jelentős szerepet játszik a gyártási idő csökkenésében, különösen új termék gyártása esetén, vagy ha egy új dolgozó kerül a gyártósorra, ugyanis a tanulási hatás a kezdeti időszakban a legszámottevőbb. Mivel az U-cella elrendezésben 7-en dolgoznak, ezért egy emberhez kevesebb művelet van rendelve, emiatt adott műszak alatt a hozzárendelt műveleteket többször végzi el, tehát a fajlagos gyártási idő csökkenése jobban érvényesül.

A tanulási görbe a következő matematikai függvénnyel írható le (Yelle, 1979; Conway és Schultz, 1959):

$$Y_Q = Y_1 \cdot Q^b \quad b \leq 0, \quad (8)$$

A gyakorlati életben inkább a tanulási ráta használata terjedt el, amely azt fejezi ki, hogy megduplázva a végrehajtott feladatok számát, hányad részére csökken a fajlagos végrehajtási idő. A tanulási ráta a következő összefüggés alapján számolható:

$$L = \frac{Y_{2Q}}{Y_Q} = \frac{Y_1 \cdot [2Q]^b}{Y_1 \cdot [Q]^b} = 2^b. \quad (9)$$

A tanulási ráta segítségével a tanulási hatás 0 és 1 között mérhető, illetve szokás megadni százalékos formában is.

A két gyártósor között a korábban említetteken túl eltérés van még abban is, hogy egy dolgozó mennyi időt tölt egy munkahelyen. A szigetszerű soron ugyanis hetente cserélnek, míg az U-cella esetében kétóránként mennek a dolgozók következő munkahelyre, így az adott munkahelyhez rendelt tevékenységek tanulási folyamata megszakad. A kétóránkénti váltás a tanulási hatásból származó előnyök szempontjából kevésbé kedvező, ugyanakkor szükség van rá, mert a gyártósoron vannak olyan munkahelyek, műveletcsoportok, amelyek fizikailag megterhelőbbek a többinél, ezért pusztán ezeket a műveleteket nem lehetne napi nyolc órán keresztül folyamatosan végezni. Számításba kell venni továbbá azt is, hogyha nagyon kevés műveletet végzünk egy munkahelyen, az túlzottan monoton, ami a figyelem csökkenésével, így a hibázás kockázatának növekedésével jár. Tehát a műszakonkénti többszöri munkahelyváltás több szempontból is indokolt lehet.

Hozzárendelés hatékonysága lineáris esetben

A gyártósor-kiegyenlítési feladatra kapott tényleges megoldás és az elméletileg optimális megoldás a műveleti idők egyenletlensége miatt gyakran eltérnek egymástól. A kettő viszonyát a hozzárendelés hatékonysága (HH) fejezi ki.

Az optimális elrendezésekhez az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modell 2-es típusát (SALBM-2) kell megoldani különböző számú munkahelyekre (N). Az SALBM-2 a ciklusidő

minimalizálásán keresztül azt vizsgálja, hogy adott számú munkahely esetén mennyi a maximálisan legyártható mennyiség.

A különböző számú munkahelyekhez (N) tartozó optimális elrendezések meghatározásával kapjuk meg a hozzárendelési hatékonyság és a gyártandó mennyiség (Q) közötti kapcsolatot leíró függvényt ($HH(Q, N)$), amely a termelésmenedzsment fontos eszköze. Lineáris esetben ez az összefüggés a következőképpen írható le (*Koltai és Tatay, 2010; Koltai és Györkös, 2013*):

$$HH(Q, N) = Q \cdot \frac{\sum_{i=1}^I t_i}{N \cdot T} \quad (10)$$

A hozzárendelés hatékonyságának legkedvezőbb (maximális) értéke 1. Ez csak akkor érhető el, ha a műveleti idők az egyes munkahelyeken megegyeznek, tehát a gyártósor teljesen kiegyenlített. A műveleti idők egyenlensége miatt azonban az ideális $HH = 1$ érték a gyakorlatban csak ritkán fordul elő. A hozzárendelés hatékonysága egyben a gyártósor hatékonyságának is a legfontosabb jellemzője.

A (10) képletből látható, hogy a hozzárendelés hatékonysága (HH) a gyártási mennyiség (Q) lineáris függvénye. Adott munkahelyszám (N) mellett azonban nem gyártható akármekkora mennyiség, Q maximális értékét (Q^{Max}) a szűk keresztmetszet műveleteinek összes ideje határozza meg. Ezért a $HH(Q)$ függvény csak a független változó 0 és Q^{Max} közötti tartományán értelmezhető. Tehát $0 \leq Q \leq Q^{\text{Max}}$.

$$Q^{\text{Max}} = \frac{T}{\text{Max}(s_j)} \quad (11)$$

Azt is látjuk, hogy ha megváltozik a munkahelyek száma (N), akkor a hozzárendelés hatékonysága is változik. Abban az esetben, ha egy mennyiség kevesebb munkahellyel is legyártható, akkor több munkahelynél alacsonyabb hatékonyságot – és ennek megfelelően az egyes munkahelyeken többnyire alacsonyabb kapacitáskihasználást – kapunk. N változásakor általában Q^{Max} értéke is megváltozik. Kevesebb munkahelynél több művelet kerül egy munkahelyre, megnő a munkahelyek műveleti ideje, így lecsökken a gyártható maximális mennyiség. Több munkahely esetén jobban szétoszthatók a műveletek a munkahelyek között, így többnyire csökken a munkahelyek műveleti ideje, és ennek megfelelően nő a maximálisan gyártható mennyiség. A feltételes mód használata azért indokolt, mert előfordulhat, hogy a munkahelyek számának változása nem változtatja meg a szűk keresztmetszet műveleti idejét.

Hozzárendelés hatékonysága tanulási hatást figyelembe vevő esetben

A szigetszerű gyártásról az U-cellára történő átállás egyik előnye, hogy adott idő alatt többet tudnak gyártani, mint amennyit a négy dolgozóról hét dolgozóra történő váltás arányosan jelentene. A gyártható mennyiségnek ez a növekedése a tanulási hatással magyarázható.

A tanulási hatást figyelembe vevő hozzárendelés hatékonyságának képlete a következők szerint módosul (*Koltai és Györkös, 2013*):

$$HH(Q, N) = \frac{\sum_{i=1}^I t_i \cdot \sum_{i=1}^Q i^b}{N \cdot T} \quad (12)$$

A tanulási hatásból következik, hogy ha kevesebb műveletet ismételgetünk egymás után, tehát kevesebb műveletet kell az adott munkahelyen elvégezni, akkor adott idő alatt többször tudjuk végrehajtani a tevékenységsorozatot, így a fajlagos gyártási idő csökkenése hamarabb következik be.

Hozzárendelési hatékonyság szemléltetése a vizsgált készülék példáján

Az általam vizsgált készülék műveleteinek logikai kapcsolata az 1. ábrán látható precedencia gráffal írható le.

Az egy műszakban rendelkezésre álló nettó idő 440 perc = 26400 mp, a műveleti idők összege 444 mp. Az SALBP-2-vel kapott ciklusidőket különböző munkahely-szám esetén a 3. táblázat tartalmazza:

3. táblázat: Ciklusidők különböző N -re

Forrás: Saját szerkesztés saját modell alapján

N :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_c [mp]:	444	232	161	124	95	88	81	66	63	63

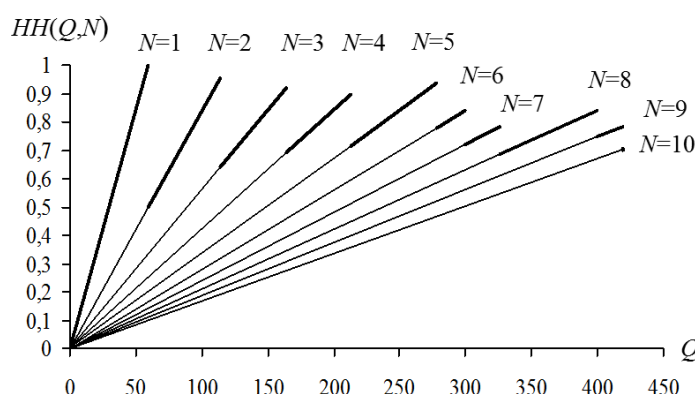
A hozzárendelés hatékonyságának ($HH(Q, N)$) alakulását az elvégzendő feladatmennyiség (Q) és a munkahelyszám (N) függvényében lineáris esetben a 2. ábra szemlélteti. Az ábra elkészítéséhez minden lehetséges N értékre meg kell oldani egy SALBP-2 modellt.

A $HH = 1$ értéket csak akkor lehet elérni több munkahely esetén, ha a tevékenységek munkahelyhez rendelésekor a műveleti idők minden munkahelyen azonosak. A gyakorlati életben ez ritkán lehetséges.

Ha adott Q mennyiség a munkahelyek számát tekintve többféle elrendezésben is legyártható, akkor a kevesebb munkahelyes elrendezés nagyobb hozzárendelési hatékonyságot eredményez, és költségek szempontjából is előnyösebb megoldáshoz vezet. Emiatt akkor a legkedvezőbb a gyártósor kialakítása, ha Q mennyiség legyártásához annyi munkahelyet alakítunk ki, amennyivel a Q mennyiség még legyártható, de ennél kevesebb munkahellyel már nem lehetne legyártani a kívánt mennyiséget. Minden N munkahelyes elrendezéshez megadható egy olyan Q tartomány - érvényességi tartomány - amely a hozzárendelési hatékonyság, és így a költségek szempontjából is a legkedvezőbb (Koltai és Györkös, 2013):

$$Q_{\max}^{\text{opt}}(N-1) \leq Q \leq Q_{\max}^{\text{opt}}(N). \quad (13)$$

Az optimális tartományok a 2. ábrán kivastagítva láthatóak.



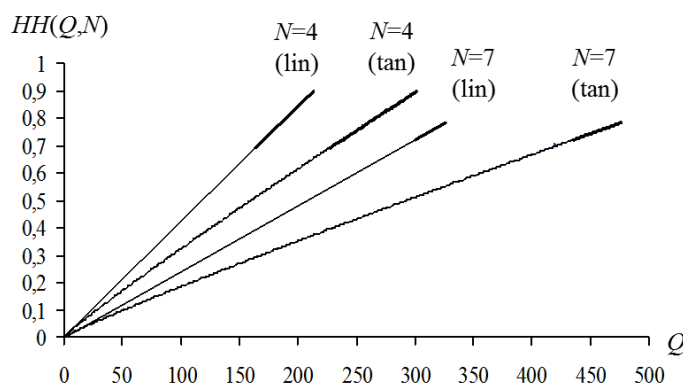
2. ábra: A hozzárendelés hatékonyságának (HH) változása a munkahely szám (N) és a gyártandó mennyiség (Q) függvényében

Forrás: Saját szerkesztés saját modell alapján

Mivel a ciklusidő értéke nem csökkenhet a (tanulási hatást is figyelembe vevő) legnagyobb műveleti idő alá ($T_c \geq t_{i, \max}$), ezért egy adott ponton túl a munkahelyek számának növelésével sem gyártható már nagyobb mennyiség (feltételezve, hogy nincsenek párhuzamos munkaálomások, mellyel a szűk keresztmetszet is változ(hat)na, és a technológia is adott). Ez látható

a 3. táblázat $N=10$ oszlopában is, ugyanis a 9-munkahelyes gyártósoron már a leghosszabb tevékenységidejű, 63 másodperces művelet képezi a szűk keresztmetszetet. Így a gyártósor hosszának további növelésével már nem érhető el termelékenység-növekedés, tekintve, hogy a gyártósor kapacitását a szűk keresztmetszetben lévő munkahely kapacitása határozza meg, ugyanakkor költségesebb megoldás lenne.

A 3. ábrán a hozzárendelés hatékonysága látható négyes és hetes elrendezésű gyártósoroknál, lineáris és tanulási hatást figyelembe vevő esetben. A számításokhoz használt tanulási ráta értéke $L = 0,95$. A hozzárendelés hatékonysága lineáris esetben a (10) képlet segítségével határozható meg, a tanulási hatást figyelembe vevő nemlineáris esetben pedig a (12) képlettel számítható. A 3. ábráról leolvasható, hogy azonos hosszúságú gyártósorok esetén többet tudunk gyártani, ha érvényesül a tanulási hatás, mint lineáris esetben, amikor nincs tanulás. Az is jól látszik, hogy tanulásnál a hosszabb gyártósoron (arányaiban) jóval magasabb optimális mennyiségi tartomány érhető el, mint rövidebb gyártósorokkal.



3. ábra: Hozzárendelés hatékonysága (HH) 4-munkahelyes és 7-munkahelyes elrendezésnél lineáris és tanulási hatást figyelembe vevő esetben

Forrás: Saját szerkesztés saját modell alapján

Alternatív optimális megoldások

A hosszabb és a rövidebb gyártósorra is igaz, hogy a feladatnak alternatív optimális megoldásai vannak, tehát a célfüggvény szempontjából ezek mindegyike optimális (SALBM-2 esetén ez a ciklusidő minimumát jelenti). Azt, hogy ezek közül melyiket válasszuk, másodlagos szempontok alapján kell eldönteni. Gyártósor-kiegyenlítésnél az alternatív optimális megoldások között különbség mutatkozik abban, hogy mely munkahely(ek) kerülnek szűk keresztmetszetbe, illetve eltérő lehet a munkahelyek kapacitáskihasználása (a munkahelyhez rendelt műveletek összes idejének és a ciklusidőnek a hányadosa) is az egyes esetekben. Így, ha például új dolgozó kerül a gyártósorra, akkor célszerű őt olyan munkahelyre beállítani, ami nincs szűk keresztmetszetben.

Lean szemlélet, ÁKFN struktúra és kapacitásjellemzők

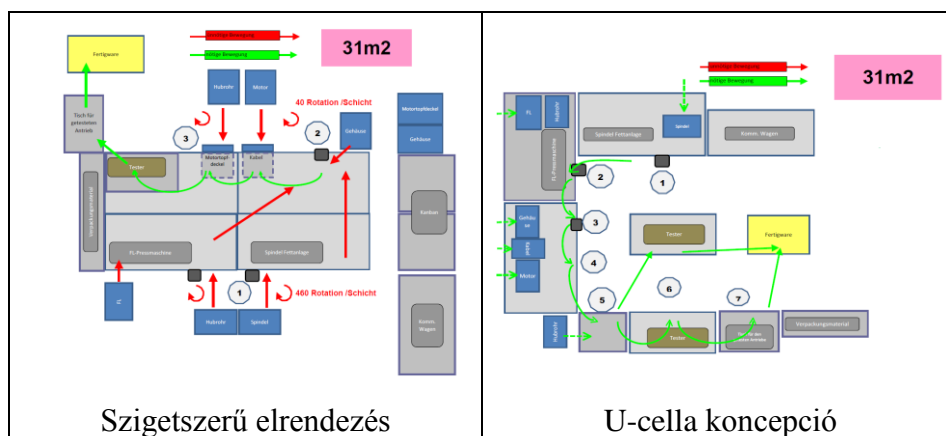
Egy gyártósor kapacitását a gyártósor szűk keresztmetszetében lévő munkaállomás kapacitása határozza meg. Gyártósor-kiegyenlítéssel a meglévő folyamatainkat, műveleteinket rendezhetjük el optimális módon. Ha további javulást szeretnénk elérni, akkor javítanunk kell a meglévő folyamatainkon. Ez minőség, kapacitás, és költségek szempontjából egyaránt előnyös lehet, melyet lean-, minőség- és folyamatmenedzsmenttel kapcsolatos szakirodalmak is tárgyalnak.

A *muda* szó jelentése veszteség (pazarlás). Olyan tevékenységeknél merül fel, amelyek erőforrást igényelnek, használnak, de nem termelnek, nem teremtenek értéket. Tekintve, hogy

a vevő csak azért hajlandó fizetni, ami számára értéket jelent, cél, hogy az értéket nem teremtő műveleteket megszüntessük, ahol lehet, és a lehető legjobban minimalizáljuk ott, ahol nem lehet teljes mértékben kiküszöbölni (Kosztolányi és Schwahofer, 2011). Ezzel jelentős költségcsökkenés érhető el, ezzel egy időben kapacitásjellemzőink is javulnak.

A veszteségnek hét fajtáját különböztetjük meg: az anyag mozgatásából (szállításából) eredő veszteség, készletben rejlő veszteség, mozdulatokban rejlő veszteség, várakozásból fakadó veszteség, túltermelésből adódó veszteség, felesleges tevékenységek miatti veszteség, és javításból eredő veszteség (Kosztolányi és Schwahofer, 2010-2011).

A négyes elrendezésről a hetes elrendezésű gyártósorra való átálláskor a vállalat nem csak a kedvezőbb kiegyenlítés és a tanulási hatás jobb kihasználása révén ért el termelékenység-növekedést, hanem azért is, mert az átállást megelőzően javítottak a gyártási folyamataikon.



4. ábra: A szigetszerű elrendezés és az U-cella koncepció sematikus ábrája

Forrás: Phoenix Mecano

A 4. ábrán a piros nyilak a mudákat jelölik. A szigetszerű elrendezésről U-cella koncepcióra való átállás során a vállalat jelentősen csökkentette:

- az értéket nem teremtő *mozdulatokban* rejlő veszteségeket (a szigetszerű elrendezésnél bizonyos alkatrészek a dolgozók mögött helyezkedtek el, ezért számottevő volt a forgásból, fölösleges lépésekből adódó veszteség – ezzel szemben az U-cella koncepcióban kívülről befelé kapják az alapanyagokat az operátorok, megszüntetve ezzel a forgások okozta idő- és energiavesztéseket), és

- az *anyagmozgatásból* eredő veszteséget (az ábrán látható, hogy a dolgozóknak maguk mögött kellett az anyagokat az asztalra átemelni, illetve az asztalon keresztül (görgősor segítségével) kellett a munkadarabokat a következő munkahelyre továbbítani).

- A kedvezőbb elrendezés miatt egyik dolgozónak sem kell a munkaasztalt megkerülnie, amikor besegít az egyik, majd másik munkahelyen lévő műveletcsoportok szerelésénél.

Látható, hogy a szigetszerű elrendezésnél jelölt mudákat az U-cella koncepciónál már kiküszöbölték. Emellett a kiegyenlített gyártósornak köszönhetően egyenletesebb a munkahelyek terhelése, ezáltal csökkent a *várakozásokból* adódó veszteség és nőtt a termelékenység.

A hagyományos és McIntyre (1977) tanulási hatást is figyelembe vevő Árbevétel-Költség-Fedezet-Nyereség (ÁKFN) struktúráját kiegészítve az alábbi, (14) összefüggéshez jutunk:

$$Ny = \hat{A} - K_{p\ddot{o}} - K_{f\ddot{o}} = a \cdot Q - (r \cdot Q + c \cdot Y_1 \cdot Q^{b+1}) - K_{f\ddot{o}} \quad (14)$$

ahol a zárójelben lévő összeg első tagja a fajlagos közvetlen anyagköltség és a mennyiség szorzata, az összes proporcionális költségen belül a lineáris rész, melyből az r tényező a termék darabjegyéből a mindenkorai árak ismeretében kiszámítható. A zárójeles kifejezés

második tagja adja a nemlineáris részt, ahol a tanulási hatás révén a darabszám növekedésével csökken az egy termék előállításához szükséges idő, így a munkaidővel járó fajlagos költségek is csökkennek.

Az ÁKFN-struktúra logikáját követve nyereségünket az alábbi módokon növelhetjük (feltételezve, hogy egy-egy tényező változásakor minden más tényező változatlan):

- növeljük a termelt (és eladott!) mennyiséget (feltételezve, hogy egységnyi termék fajlagos fedezete pozitív),
- egységnyi termék árának növelésén keresztül növeljük az árbevételt,
- csökkentjük a költségeket. Ezen belül két lehetőségünk van: csökkentjük a fix költségeket, illetve csökkentjük a változó költségeket.
- valamint a fentebbiek megfelelő lineáris kombinációját alkalmazzuk.

A vállalat a gyártósor optimalizálása, veszteségek csökkentése, folyamatainak javítása révén a *változó költségek csökkenésén* keresztül ért el profitnövekedést. Ezzel egy időben az üzem a kapacitásjellemzőit is javította, hiszen ha csökken a termék fajlagos előállítási ideje, akkor nő mind a tervezési, mind az effektív kapacitás (vö. Koltai, 2006, 77.o.).

Összefoglalás

A Phoenix Mecano Kecskemét Kft. nagy hangsúlyt fektet a termelékenységi és a hatékonysági folytonos javítására, ezért érdekelt minden olyan módszer alkalmazásában, ami ezt elősegíti.

A vizsgált időszakban a tanulmányban bemutatott terméket még kétféle gyártósoron szerelték össze, 4-es elrendezésben és az akkor még próba jelleggel működő 7-es elrendezésben. Mára ezt a készüléket kizárólag U-cella koncepcióban gyártják, ugyanis ez bizonyult hatékonyabbnak minőség, termelékenység és költségek tekintetében egyaránt.

A tanulmányban bemutattam az egyszerű gyártósor-kiegyenlítés 2-es modelljét (SALBM-2), melynek célja a ciklusidő adott munkahely-szám melletti minimalizálása. Ezt alkalmaztam a két gyártósorra, amelyen a vizsgált készüléket a kutatás kezdetekor gyártották. Ismertettem, hogy az elméleti modell és a gyakorlati normaadatok ellentétes eredményre vezetnek az egy főre vetített hatékonyság tekintetében a két gyártósornál, amely különbség (részben) a tanulási hatással magyarázható.

A 2-es modell különböző munkahely-szám melletti megoldásával egy olyan ábra készíthető, amely megadja, hogy adott gyártandó mennyiség esetén mely gyártósor-elrendezés a legkedvezőbb költségek és hozzárendelés hatékonysága szempontjából. Ha a tanulási hatást is figyelembe vesszük, láthatjuk, hogy noha a hozzárendelés hatékonyságának maximális értéke megegyezik a lineáris esettel, az optimális mennyiségi tartományok lényegesen eltérnek, ami jelentősen befolyásolja azt, hogy adott gyártandó mennyiség esetén milyen elrendezést ajánlatos kialakítani. Ezért fontos, hogy a tanulás mértékét jól mérjük fel a gyártás egyes fázisaiban. A hozzárendelés hatékonysága diagram a menedzsment számára fontos döntéstámogató eszköz lehet, azonban fontos figyelembe venni a tanulási hatást a számítások során, hogy a valóságot jobban közelítő modellt kapjunk.

A tanulási hatást figyelembe vevő modellben homogén tanulást feltételeztünk, tehát azt, hogy minden munkahelyen azonos tanulási ráta érvényesül. A másik feltételezés, hogy a szűk keresztmetszet helye nem változik a gyártás során. A harmadik feltételezés, hogy a teljes mértékben kiegyenlített gyártósorral érhető el maximális termelékenység. Alacsony gyártási tételnagyság esetén ez nem feltétlenül van így, ugyanis hatékonyabb lehet egy meghatározott módon kiegyenlített gyártósor, tekintve, hogy kis tételnagyság esetén a szűk keresztmetszet helye is változik (erről ld. bővebben Cohen, 2006).

Bemutattam továbbá azt is, hogy a folyamatokban lévő veszteségek csökkentése, ilyen módon a folyamatok javítása hogyan hat a változó költségen keresztül a nyereségre, valamint hogyan javítja a kapacitásjellemzőket.

Kutatásom további iránya a modellek másodlagos szempontok mentén történő továbbfejlesztése és gyakorlati megvalósíthatóságának vizsgálata. Diszkrét szimuláció segítségével fogom vizsgálni a tanulás gyártósorokra, azok szűk keresztmetszetére, kapacitására és további működési jellemzőire kifejtett hatását.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőm, Dr. Koltai Tamás (egyetemi tanár, BME MVT), valamint vállalati konzulensem, Angeli Attila (minőség- és környezetirányítási vezető, Phoenix Mecano Kecskemét Kft.) segítségét, továbbá köszönöm a Phoenix Mecano Kecskemét Kft. dolgozóinak, hogy segítették munkámat és a szükséges információkkal hozzájárultak a kutatásomhoz.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik az "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatta.

Irodalomjegyzék

- Boysen, N., Flidner, M., & Scholl, A. (2008). *Assembly Line Balancing: Which Model to Use When?*, International Journal of Production Economics, 111, pp. 509-528.
- Cohen, Y., Vitner, G., & Sarin, S. C. (2006). *Optimal Allocation of Work in Assembly Lines for Lots with Homogenous Learning*, European Journal of Operational Research, Vol. 168, Issue 3, pp. 922-931.
- Conway, R., & Schultz, A. (1959). *The Manufacturing Progress Function*, Journal of Industrial Engineering, Vol. 10, No.1, pp. 39-53.
- Corominas, A., Pastor, F., & Plans, J. (2008). *Balancing Assembly Line with Skilled and Unskilled Workers*, Omega, Vol. 36, pp.1126-1132
- Cortes, P., Onieva, L., & Guadix, J. (2010). *Optimizing and Simulating the Assembly Line Balancing Problem in a Motorcycle Manufacturing Company: A Case Study*, International Journal of Production Research, Vol. 48, No. 12, pp. 3637-3656
- Koltai, T. (2006). *Termelésmenedzsment*, Kapacitáselemzés (pp.76-90.), Typotex, Budapest
- Koltai, T., & Györkös, R. (2012). *Comparison of the Optimal Performance of Assembly Line Configurations with Simple Assembly Line Balancing Models*, In: XXVI. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century, Miskolc, Hungary, pp. 1-6.
- Koltai, T., & Györkös, R. (2013). *Analysis of the Efficiency of Task Assignment in the Presence of Learning Effect*, In: XXVI. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century, Miskolc, Hungary, pp. 1-6.
- Koltai, T., & Tatay, V. (2010). *Application of Simple Assembly Line Balancing Models to Support Production Quantity Related Decisions*, 16th International Working Seminar on Production Economics, Innsbruck, Ausztria, Vol. 1, pp. 285-296.
- Kosztolányi, J., & Schwahofer, G. (2011). *Lean szótár*, Kaizen Pro, Oktató és Tanácsadó Kft.
- McIntyre, E.V. (1977). *Cost-Volume-Profit Analysis Adjusted for Learning*, Management Science, Vol.24, No.2, pp.149-160.
- Pastor, R., & Ferrer, L. (2009). *An Improved Mathematical Program to Solve the Simple Assembly Line Balancing Problem*, International Journal of Production Research, Vol. 47, No. 11, pp. 2943-2959
- Phoenix Mecano honlapja (2013, June 24). www.phoenix-mecano.hu
- Yelle, L. E. (1979). University of Lowell, Education, *The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey*, Decision Sciences, Vol.10., pp. 302-328.